

Досліджений газодинамічний подільник для завдання різновеликих тисків (перепадів) і одержані залежності для незмінності його коефіцієнтів поділу від зміни вхідного тиску. Розроблені схеми каскадного з'єднання і бінарного відгалуження лінійних подільників, які відтворюють різновеликі тиски (наприклад, перепади $1...10^4$ Па) і які доцільно використовувати у задавачах мікровират, синтезаторах газових сумішей і калібраторах тисків

Ключові слова: відтворення тисків, капіляр, суматор і подільник потоків, лінійний подільник тисків

Исследован газодинамический делитель для задания существенно разных давлений (перепадов) и получены зависимости для постоянства его коэффициентов деления от изменения входного давления. Разработаны схемы каскадного и бинарного ответвления линейных делителей, которые воспроизводят существенно разные давления (например, перепады $1...10^4$ Па) и которые целесообразно использовать в задатчиках микрорасходов, синтезаторах газовых смесей и калибраторах давлений

Ключевые слова: воспроизведение давлений, капилляр, сумматор и делитель потоков, линейный делитель давления

УДК 681.2.53.082.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75231

РОЗРОБЛЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗАВДАННЯ МАЛИХ ТИСКІВ

І. В. Ділай

Доктор технічних наук, доцент*

E-mail: divlv@ukr.net

З. М. Теплюх

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: atxp2010@gmail.com

Р. Б. Брилинський

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: brblv@ukr.net

І.-Р. З. Кубара

Аспірант*

E-mail: kizlv@ukr.net

*Кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

Розвиток сучасних технологій (мікроелектроніка, медицина, біотехнології), поширення газоаналітичних систем, зокрема для визначення забруднення атмосферного повітря, а також виконання наукових досліджень потребують високоточних систем стабілізації параметрів газових потоків, в першу чергу тисків, оскільки вони визначають витрати потоків у таких газодинамічних системах [1, 2].

Промислові задавачі (стабілізатори), як правило, призначені для підтримання відносно високих тисків, а для газодинамічних систем, зокрема газоаналітичних, часто потрібні також малі надлишкові тиски (перепади тисків) – на рівні сотень, десятків паскаль і менше [3, 4].

Для приготування складних багатокомпонентних сумішей (наприклад, з мікро- і наноконцентраціями компонентів) газодинамічним методом потрібно забезпечити суттєво різні перепади тисків на капілярах змішувача для різних компонентів [5]. Тобто потрібна ціла система різних засобів для стабілізації тисків компонентів. Так, наприклад, для приготування штучного природного газу з 13 компонентів необхідна відповідна кількість засобів. Це робить систему громіздкою і недосконалою, оскільки на неї суттєво впливають завади (тиски джерел компонентів, барометричний тиск, температура тощо).

Подібна ситуація існує в хроматографах із завданням витрати газу-носія, де похибка встановлення витрати може сягати 5 % [6].

Отже, розроблення високоточних засобів одночасного відтворення різновеликих тисків (перепадів), серед яких і дуже малі, є актуальним.

2. Аналіз публікацій та постановка проблеми

Для забезпечення якісної роботи будь-якої газодинамічної системи (наприклад, газоаналізаторів, хроматографів, задавачів малих витрат) необхідно стабілізувати параметри (завади), які впливають на їх роботу. Так, наприклад, з цією метою у системі контролю складу димових газів [7] застосовують блок стабілізації вхідних параметрів, оскільки якщо подавати аналізований газ з нестабілізованими параметрами безпосередньо на вимірювальний перетворювач, то це призведе до отримання на виході інформації про його склад з великою похибкою.

В той же час розробники газоаналітичних систем не завжди приділяють достатньо уваги зменшенню впливу завад, а інколи вважають достатнім початково відрегулювати витрату газу за допомогою дроселя [8].

Традиційно для зменшення впливу зовнішніх факторів стабілізують тиски (перепади тисків) на вході

газодинамічної системи та окремих її елементах, або витрати газів.

Підтримання різних за значенням тисків у одній системі здійснюють встановленням кількох стабілізаторів, часто різнотипних за принципом дії, конструкцією, діапазоном і за видом стабілізованих тисків (надлишковий чи абсолютний). Так, наприклад, у пристроях для динамічного приготування газових сумішей застосовані як типові редуктори, так і регулятори тиску типу «до себе» [9]. Особливо показовою є така ситуація в газодинамічних змішувачах складних багатокомпонентних газових сумішей з мікро- і макроконцентраціями компонентів [10–12]. Внаслідок неідентичності характеристик стабілізаторів на значення стабілізованих тисків у таких газодинамічних системах завади (наприклад, тиски на вході та виході системи, барометричний тиск, температура) чинять різний вплив як за величиною, так іноді і за напрямком.

Подібна ситуація існує і з стабілізацією витрат газів. Так, автоматична система газового змішування оснащена багатьма незалежно працюючими контролерами масової витрати газу з різними за величиною завданнями витрат – 20 і 500 мл/хв [13].

Дослідженнями встановлено, що ці фактори спричиняють похибки визначальних параметрів різних газодинамічних систем, так, наприклад похибка генераторів газових сумішей складає 2–3 % [14]. У зв'язку з цим актуальною залишається задача компенсації впливів цих завод.

Крім того, відомі засоби для стабілізування малих тисків не завжди відповідають сучасним вимогам. Так, наприклад, стабілізування малих тисків інколи здійснюють за допомогою рідинного маностата, який є фактично лабораторним приладом [15].

Таким чином, розроблення задавачів різновеликих тисків, які б уможливили компенсацію впливів завод і тим самим забезпечили зменшення похибок визначальних параметрів різних газодинамічних систем, слід вважати перспективним. Це, зокрема, дасть можливість вирішення проблеми заміни стабілізаторів у газодинамічній системі повторювачами тисків, які відтворюють міждросельні тиски окремої дросельної схеми, яка не зв'язана потоками газів з основною газодинамічною системою [5, 6]. Це може бути, наприклад, підсистема завдання стабілізованих тисків, побудована на основі послідовного і паралельного з'єднання капілярів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є поліпшення характеристик газодинамічних систем завдяки підвищенню точності стабілізації, зокрема малих тисків.

Задачами роботи є:

- дослідження і побудова лінійних подільників тиску з метою їх застосування в газодинамічних системах завдання різновеликих тисків (перепадів);
- розроблення схем для забезпечення суттєвого збільшення коефіцієнтів поділу тисків у порівнянні з окремим подільником;
- побудова високоточного чотиридекадного дискретного задавача абсолютних тисків (перепадів тисків), який забезпечує їх лінійність при зміні тиску живлення.

4. Лінійні капілярні подільники тиску

Подільник тиску – це послідовне з'єднання дроселів D_j ($j=1, \dots, m$), газодинамічний опір кожного з яких спричиняє певне зменшення міждросельного тиску ($P_{m-1} > \dots > P_{j-1} > \dots > P_1$) внаслідок дроселювання потоку (рис. 1). Масова витрата через дроселі подільника є рівною $G = G_m = \dots = G_j = \dots = G_1$, а перепади тиску на кожному з них дорівнюють $\Delta P_j = P_j - P_{j-1}$.

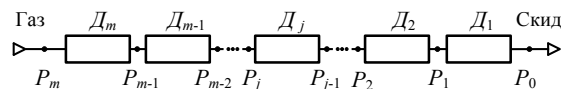


Рис. 1. Багатодросельний подільник тисків

Для побудови подільників тиску можна використувати дросельні елементи, які забезпечують як ламинарний характер ($Re \leq 2320$) потоку дросельованого газу – капілярні трубки (металеві чи скляні), так і турбулентний потік – діафрагми, сопла, годинникові камені тощо. Проте для газодинамічних схем, зокрема і подільників тиску, найперспективнішим є використання скляних капілярних елементів КЕ. Такі елементи (капіляри) мають стабільні витратні характеристики, практично не змінюють геометричних розмірів (діаметрів d і довжин l) прохідних каналів при зміні температури. Завдяки плавному скороченню довжини каналу (наприклад, шліфуванню торця) капіляра забезпечують високоточне підбирання його газодинамічного опору [6]. У зв'язку із вказаними перевагами в розроблених схемах як дроселі застосовані капіляри.

Для збільшення кількості різних значень міждросельних тисків у подільнику на місце окремих дроселів D_j можна встановити пакет P_j капілярів (паралельне з'єднання) або блок, утворений комбінацією послідовного та паралельного з'єднань капілярів. Пакет P_j капілярів виконують як пакет змінного газодинамічного опору, а необхідні капіляри залучають завдяки встановленню на їх виходах електромагнітних клапанів.

Залежність масової витрати G газу через капіляр КЕ_і подільника має вигляд [16]

$$G = A_j \left(\left[1 + Y_j \Delta P_{j,j-1} (\Delta P_{j,j-1} + 2P_{j-1}) \right]^{0.5} - 1 \right), \quad (1)$$

де $A_j = a_1 l_j = (4\pi \mu \xi^{-1}) l_j$ – коефіцієнт витрати; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу; ξ – коефіцієнт кінцевих ефектів; $Y_j = K_j X$ – комплекс розмірів каналу, параметрів виду газу та температури; $K_j = \xi d_j^4 l_j^{-2}$ – конструктивний комплекс; d_j, l_j – діаметр і довжина каналу капіляра; $\Delta P_{j,j-1} = P_j - P_{j-1}$ – перепад тиску на капілярі; X – параметричний комплекс газу, $X = (512 R_g T \mu^2)^{-1}$; $R_g = R/M$ – газова стала; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газу; M – молекулярна маса. Розміри прохідних каналів капілярів, які застосовують в газодинамічних пристроях, обмежені з конструктивних міркувань і належать діапазонам $d_j \in [0,05 \cdot 10^{-3}; 0,5 \cdot 10^{-3}]$ м; $l_j \in [5 \cdot 10^{-3}; 0,15]$ м.

При побудові подільників тисків важливо забезпечити лінійність зміни міждросельних тисків від зміни тиску P_m на вході подільника. Проте це можливо лише коли всі елементи подільника є лінійними, а витратна характеристика капіляра в загальному є нелінійною. Лінійність витратної характеристики окремого капі-

ляра можна забезпечити при певному співвідношенні довжини і діаметра його каналу і постійних абсолютних температурі і тиску газу на виході. Як видно з рис. 1, в подільнику тиску вказані вимоги легко забезпечити для дроселя D_1 (капіляр KE_1).

Умова лінійності витратної характеристики капіляра KE_1 , одержана із $\partial^2 G / \partial (\Delta P_1)^2 = 0$ має вигляд

$$Y_1 P_0^2 = 1. \quad (2)$$

Залежність витрати газу для лінійного капіляра KE_1 з врахуванням (2) набуває вигляду

$$G = a_1 P_0^{-1} \Delta P_1 l_1 = a_1 (\xi X)^{1/2} \Delta P_1 d_1^2. \quad (3)$$

Подільники тиску, зокрема і капілярні, в загальному є нелінійними системами, однак вибором конструктивних розмірів їх капілярів, як показано далі, можна забезпечити лінійність міждросельних тисків P_j при зміні тиску на вході подільника P_m . Лінійні подільники відкривають перспективу поліпшення характеристик газодинамічних систем, зокрема для приготування складних сумішей завдяки компенсації зміни витрат компонентів при зміні тисків на входах дозуючих капілярів [5, 16]. У зв'язку з цим надалі розглянуті лише лінійні капілярні подільники тисків та схеми на їх основі.

4. 1. Двокапілярний подільник тисків

Найпростіший лінійний капілярний задавач тиску будують на основі двоелементного подільника (рис. 1 для $m=2$), в якому на місце кожного дроселя D_j встановлюють капіляр KE_j ($j=1, 2$). За допомогою такого подільника можна задавати три перепади ($\Delta P_1 = P_1 - P_0$, $\Delta P_{21} = P_2 - P_1$, $P_2 = P_2 - P_0$), а також три тиски (P_2 , P_1 і P_0), які пов'язані залежністю $P_1 = f(P_2, P_0)$, що може бути лінійною.

Необхідною умовою побудови таких подільників є лінійність витратної характеристики (1) капіляра KE_1 , яка із дотриманням умови $\partial^2 P_1 / \partial P_2^2 = 0$, тобто рівності нулю кривизни характеристики $P_1 = f(P_2, P_0)$, забезпечує лінійність подільника.

Залежність $P_1 = f(P_2, P_0)$, одержана для двоелементного подільника з лінійним капіляром KE_1 , має вигляд

$$P_1 = V^{-1} \left[(1 - \lambda) P_0 + \left[\delta^4 V (P_2^2 - P_0^2) + W^2 P_0^2 \right]^{1/2} \right], \quad (4)$$

де

$$V = 1 + \delta^4, \quad \delta = d_2 / d_1, \quad W = \lambda + \delta^4, \quad \lambda = l_2 / l_1.$$

Із (4) з врахуванням умови $\partial^2 P_1 / \partial P_2^2 = 0$ отриманий вираз, який зв'язує розміри капілярів подільника і який разом із залежністю (2) є умовою лінійності двокапілярного подільника тисків

$$\left. \begin{aligned} \delta^4 &= \lambda^2 (1 - 2\lambda)^{-1}; \\ Y_1 P_0^2 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Після підстановки першого рівняння системи (5) у вираз (4) одержуємо залежність міждросельного тиску P_1 від вхідного тиску P_2 для лінійного двокапілярного подільника у формі

$$P_1 = \lambda (1 - \lambda)^{-1} (P_2 - P_0) + P_0. \quad (6)$$

Визначальною характеристикою двокапілярного подільника є коефіцієнт χ_1 поділу тисків

$$\chi_1 = (P_2 - P_0) / (P_1 - P_0) = \Delta P_2 / \Delta P_1, \quad (7)$$

де ΔP_2 , ΔP_1 – перепад тиску відповідно на подільнику і на першому капілярі.

4. 2. Багатокapілярний подільник

Для завдання одним подільником більшої кількості різних перепадів (абсолютних тисків) можна будувати багатеlementні подільники (рис. 2), які завдяки відповідним розмірам прохідних каналів капілярів можуть забезпечити необхідні значення міждросельних тисків P_j ($j=1, m-1$), а також їх лінійність від зміни P_m , а тим самим і постійні коефіцієнти поділу χ_j , які визначають згідно із залежністю

$$\chi_j = (P_m - P_0) / (P_j - P_0) = \Delta P_m / \Delta P_j, \quad (8)$$

де ΔP_m , ΔP_j – перепад тиску відповідно на всьому подільнику і на j капілярах (від виходу).

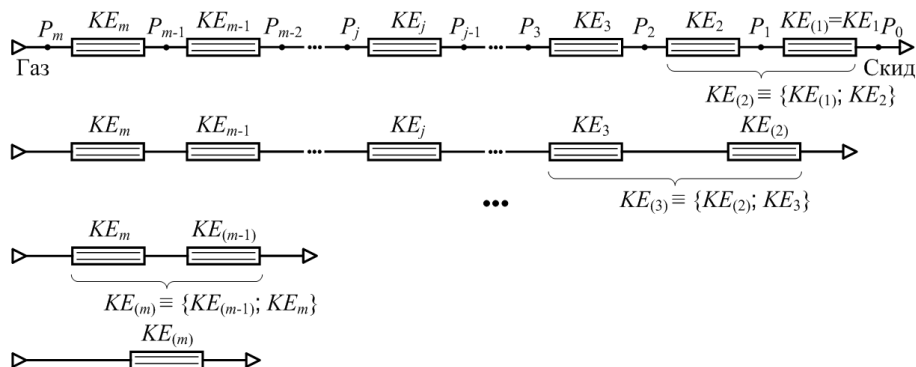


Рис. 2. Багатокapілярний подільник тисків і $m-1$ еквівалентних його перетворень

Необхідною умовою побудови лінійного багатокapілярного подільника тисків, як і двокапілярного, є лінійність витратної характеристики капіляра KE_1 .

Для визначення решти розмірів (d_j і l_j для $j=2, m$) прохідних каналів лінійного m -капілярного подільника тисків виконують послідовне заміщення $m-1$ пар $\{KE_j; KE_{(j-1)}\}$ сусідніх капілярів еквівалентним лінійним капіляром $KE_{(j)}$ на основі залежностей (5) і (6), де $KE_{(j-1)}$ – умовне позначення еквівалентного лінійного капіляра, який є заміною послідовності KE_1, \dots, KE_{j-1} капілярів подільника уявним капіляром з діаметром $d_{(j-1)}$ і довжиною $l_{(j-1)}$ (рис. 2).

Для довільної пари капілярів, наприклад $\{KE_j; KE_{(j-1)}\}$, при заданих тисках P_j, P_{j-1} і P_0 залежність (6) набуває вигляду

$$P_{j-1} = \lambda_{(j-1)} (1 - \lambda_{(j-1)})^{-1} (P_j - P_0) + P_0. \quad (9)$$

З врахуванням того, що $\lambda_{(j-1)} = l_j / l_{(j-1)}$ із (9) отримують залежність для визначення довжини l_j прохідного каналу капіляра KE_j .

Для вищевказаної пари капілярів $\{KE_j; KE_{(j-1)}\}$ на основі першого рівняння системи (5) одержують залежність

$$\delta_{(j-1)}^4 = \lambda_{(j-1)}^2 (1 - 2\lambda_{(j-1)})^{-1}, \quad (10)$$

де $\delta_{(j-1)} = d_j / d_{(j-1)}$, а з неї – вираз для діаметра d_j капіляра KE_j .

У результаті система рівнянь для визначення розмірів (d_j, l_j) прохідних каналів капілярів має вигляд [16]:

$$\left. \begin{aligned} d_j &= d_{(j-1)} / g_j; \\ l_j &= l_{(j-1)} / y_j; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} j &= \overline{2, m}; \quad d_{(j-1)} = \left[\sum_{k=1}^{j-1} d_{i,k}^{-4} \right]^{-1/4}; \quad g_j = [D_{(j-1)}^2 - 1]^{1/4}; \\ l_{(j-1)} &= \kappa d_{(j-1)}^2; \quad y_j = D_{(j-1)} + 1; \quad D_{(j-1)} = D_{j-1} D_j^{-1}; \\ D_{j-1} &= \Delta P_m / \Delta P_{j-1} = \chi_{j-1}; \quad \Delta P_{j-1} = P_{j-1} - P_0; \\ \kappa &= P_0 \sqrt{\xi X}; \quad d_{(1)} = d_i; \quad l_{(1)} = l_i. \end{aligned}$$

Розміри (d_i, l_i) прохідного каналу лінійного капіляра KE_i визначають з врахуванням забезпечення необхідного коефіцієнта поділу і витрати через капіляр.

За результатами досліджень лінійних подільників тиску встановлено, що максимальне значення коефіцієнта поділу χ_{\max} , як правило, не перевищує 30 і може бути досягнуте лише у двокапілярному подільнику, а для багатокapілярних є дещо меншим [5].

4. 3. Схема каскадного з'єднання подільників тисків

Для завдання різновеликих (на рівні кількох порядків) перепадів тисків і забезпечення постійних коефіцієнтів поділу запропонована схема (рис. 3) каскадного з'єднання лінійних багатокapілярних подільників ($i=1, \dots, n$) із довільною кількістю капілярів $KE_{i,j}$, де $j=1, \dots, m_i$ [5, 16].

Максимальне значення коефіцієнта χ_{\max} поділу каскадної схеми у разі використання в кожному з n каскадів лінійних двокапілярних подільників тиску складає $\chi_{\max} = \chi_{\max}^n \approx 30^n$.

Схема має один вхідний канал, в якому потік розгалужується на n подільників тиску. На вході кожного подільника задають відповідні тиски: на першому – за допомогою стабілізатора абсолютного чи надлишкового тисків, а на решті подільників тиски відтворюють повторювачами Π_{Tk} ($k=2, \dots, n$), камера завдання кожного з яких під'єднана до першої (від виходу газу) міжросельної камери, утвореної капілярами $KE_{k-1,2}$ і $KE_{k-1,1}$ попереднього $k-1$ -го подільника. Виходи всіх подільників тисків з'єднані у вихідний канал (суматор потоків), тиск P_0 газу в якому підтримують постійним за допомогою стабілізатора абсолютного тиску [17]. Стабілізатори тисків на вході і виході схеми (рис. 3) не показані.

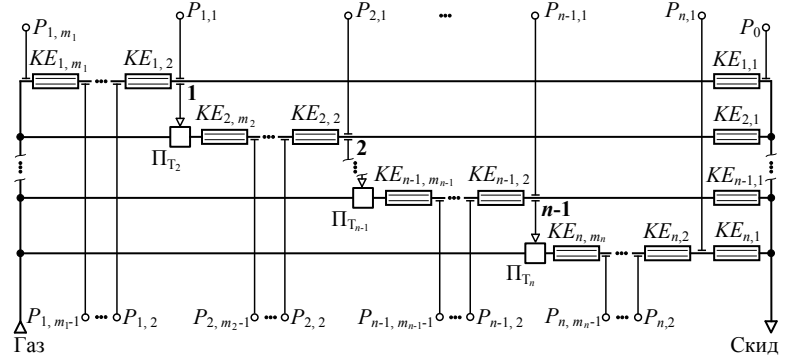


Рис. 3. Узагальнена принципова схема каскадного з'єднання подільників тисків для завдання різновеликих тисків (перепадів)

Нижче представлена система рекурентних залежностей, побудована на основі системи (11), для визначення розмірів ($d_{i,j}$ і $l_{i,j}$) усіх прохідних каналів капілярів $KE_{i,j}$ каскадного з'єднання лінійних подільників тиску

$$\left. \begin{aligned} d_{i,j} &= d_{i,(j-1)} / g_{i,j}; \\ l_{i,j} &= l_{i,(j-1)} / y_{i,j}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} i &= \overline{1, n}; \quad j = \overline{2, m_i}; \quad d_{i,(j-1)} = \left[\sum_{k=1}^{j-1} d_{i,k}^{-4} \right]^{-1/4}; \quad g_{i,j} = [D_{i,(j-1)}^2 - 1]^{1/4}; \\ l_{i,(j-1)} &= \kappa d_{i,(j-1)}^2; \quad y_{i,j} = D_{i,(j-1)} + 1; \quad D_{i,(j-1)} = D_{i,j-1} / D_{i,j}; \\ D_{i,j-1} &= \Delta P_m^{(i)} / \Delta P_{j-1}^{(i)} = \chi_{i,j-1}; \quad \Delta P_{j-1}^{(i)} = P_{i,j-1} - P_0; \\ \kappa &= P_0 \sqrt{\xi X}; \quad d_{i,(1)} = d_{i,1}; \quad l_{i,(1)} = l_{i,1}. \end{aligned}$$

Перевагою цієї схеми є те, що вона залишається лінійною при перемиканні камер завдання повторювачів Π_T до інших міжросельних камер подільників вищого тиску. Завдяки цьому без зміни конструкції капілярів кожного з подільників схема може забезпечити суттєве збільшення кількості задаваних міжросельних тисків $P_{i,j}$.

Проте така схема має обмеження на значення нижньої межі завдання тиску, що пов'язане із похибками відтворення тисків повторювачами. Так, для повторювачів індивідуального виготовлення і підгонки їх пари «сопло-заслінка» абсолютна похибка відтворення (повторення) тиску може складати кілька десятків паскаль, а для промислових повторювачів є на порядок більшою [18].

Похибку відтворення тиску можна суттєво зменшити при застосуванні окремого вузла відтворення тиску. Такий вузол представляє собою систему автоматичного регулювання з від'ємним зворотнім зв'язком, яка містить високочутливий нуль-індикатор для виявлення різниці тисків $\Delta P_{Н1}$ на виході вузла відтворення тиску і у камері завдання повторювача, до якого під'єднаний регульований дросель, зміною газодинамічного опору якого усувають $\Delta P_{Н1}$.

4. 4. Схема з бінарним відгалуженням подільників

Перспективною для побудови систем завдання різновеликих тисків є схема з бінарним відгалуженням подільників, представлена на рис. 4. У загальному кожен

з її n подільників тисків є багатоеlementним і містить відповідно m_i ($i=1, \dots, n$) капілярів. За допомогою такої схеми, на відміну від каскадної, можна одержати значення міждросельних тисків на рівні часток паскаля.

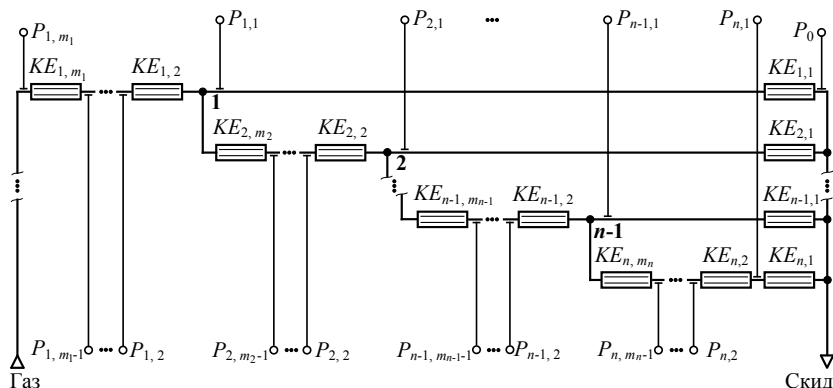


Рис. 4. Узагальнена принципова схема з бінарним відгалуженням подільників для завдання малих тисків (перепадів)

На вхід схеми, який одночасно є входом першого подільника, надходить газ під тиском P_{1,m_1} . У протічній камері цього подільника, утвореній капілярами $KE_{1,1}$ і $KE_{1,2}$, потік відгалужується на вхід другого подільника. Далі кожний наступний i -й подільник, який під'єднаний до відповідної міждросельної камери $i-1$ -го подільника, утвореної капілярами $KE_{i-1,1}$ і $KE_{i-1,2}$, відгалужує частину потоку.

У результаті такого з'єднання n подільників тисків у схемі утворюється $n-1$ вузлів, на рис. 4 наведені пронумерованими (1, ..., $n-1$) точками. Виходи всіх подільників тиску об'єднані в один канал, в якому підтримують постійний тиск P_0 .

Для реалізації лінійної функції зміни міждросельних тисків $P_{i,j} = f(P_{1,m_1})$ розроблений алгоритм визначення розмірів прохідних каналів капілярів схеми, представлений в [5].

На основі законів збереження маси та Кірхгофа при залученні залежності (1) для схеми бінарного відгалуження подільників тисків отримана її математична модель

$$\left. \begin{aligned} G_{i,m_i} &= G_{i,m_{i-1}}; \\ \dots \\ \dot{G}_{i,j} &= G_{i,j-1}; \\ \dots \\ \dot{G}_{i,3} &= G_{i,2}; \\ G_{i,2} &= G_{i,1} + G_{i+1,m_{i+1}}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де

$$G_{i,j} = \Phi(P_{i,j}, P_{i,j-1}) = A_{i,j} \left[\left(1 + Y_{i,j} \Delta P_j^{(i)} (\Delta P_j^{(i)} + 2P_{i,j-1}) \right)^{0.5} - 1 \right]$$

масова витрата газу через капіляр $KE_{i,j}$ ($i=1, \dots, n$ – номер, n – кількість гілок; $j=1, m_i$ – номер капіляра в гілці від виходу до входу газу, m_i – кількість капілярів

рів i -ї гілки); $A_{i,j} = a_i l_{i,j}$; $Y_{i,j} = \xi d_{i,j}^4 l_{i,j}^{-2} X$; $\Delta P_j^{(i)} = P_{i,j} - P_{i,j-1}$; $G_{n+1,m_{n+1}} = 0$ оскільки $n+1$ -го відгалуження не існує.

Математична модель (13) є системою $\sum_{i=1}^n (m_i - 1)$ нелінійних рівнянь відносно міждросельних тисків $P_{i,j}$ і дає можливість дослідити вплив змін тисків P_{1,m_1} , P_0 і температури T газу на коефіцієнти поділу $\chi_{i,j}$ тисків розглянутої схеми.

Максимальний коефіцієнт χ_{Bmax} поділу схеми з бінарним відгалуженням подільників із лінійною функцією $P_{i,j} = f(P_{1,m_1})$ є рівним χ_{Cmax} .

5. Декадний задавач малих тисків

Відомі засоби для завдання надлишкових тисків і перепадів працюють в діапазоні з нижньою границею, як правило, більше 10 кПа. У газоаналітичній практиці часто виникає потреба у завданні стабілізованих різновеликих тисків і перепадів тисків з діапазону, верхня границя якого не перевищує 10 кПа. У зв'язку з цим розроблений чотиридекадний капілярний задавач у діапазонах: {1, 2, ..., 9}, {10, 20, ..., 90}, {10², 2·10², ..., 9·10²}, {10³, 2·10³, ..., 10⁴} Па (рис. 5).

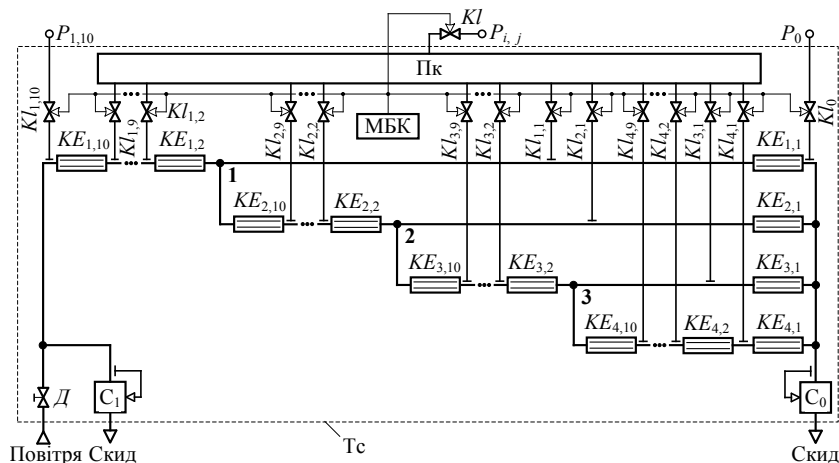


Рис. 5. Принципова схема чотиридекадного задавача тисків: Пк – пневматичний комутатор; МБК – мікропроцесорний блок керування; $Kl_{i,j}$ – електромагнітний клапан, встановлений на лінії відбору тиску $P_{i,j}$ з міждросельної камери, утвореної капілярами $KE_{i,j+1}$ і $KE_{i,j}$; Д – змінний дросель; Тс – термостат; C_1 , C_0 – стабілізатори абсолютного тиску

Схема задавача (рис. 5) побудована на основі принципової схеми з бінарним відгалуженням подільників тиску, наведеної на рис. 4. Задавач утворений чотирма гілками, кожна з яких містить подільник тисків з 10 капілярів. Схему живлять повітрям, тиск якого на вході $P_{1,10} = 115$ кПа та виході $P_0 = 105$ кПа дросельної схеми підтримують постійним відповідно стабілізатором абсолютного тиску C_1 і стабілізатором C_0 . Всі елементи схеми поміщені в термостат Тс, який підтримує значення температури $T = 313$ К.

Для почергового завдання міждросельних тисків $P_{i,j}$ відповідні камери за допомогою електромагнітних

клапанів Kl_{ij} під'єднують до пневматичного комутатора P_k , вихідний канал якого клапаном Kl з'єднують із споживачем. Завданням певної послідовності (окремого значення) тисків керує МБК, який вмикає відповідні електромагнітні клапани.

Усі міжросельні тиски $P_{i,j}$, а також вхідний $P_{1,10}$ і вихідний P_0 тиски задавача, можна відтворювати одночасно без використання комутатора P_k .

Кількість $k_{\Delta P}$ різних перепадів тисків у разі завдання у межах i -го подільника однакових перепадів тисків на кожному з його капілярів (рис. 4), тобто $\Delta P_1^{(i)} = \Delta P_2^{(i)} = \dots = \Delta P_{m_i}^{(i)}$, визначають згідно із залежністю

$$k_{\Delta P} = m_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \left[[m_i - \text{sgn}(i-1)] \cdot \left[\sum_{j=i+1}^n (m_j - 1) \right] \right]. \quad (14)$$

Отже, представлений на рис. 5 задавач може завдавати одночасно 523 різних перепадів тисків.

Для забезпечення лінійності і декадного поділу тисків в кожному з подільників схеми розміри прохідних каналів визначені за алгоритмом, представленим в [5].

Математична модель розробленого задавача тисків має вигляд

$$\left. \begin{aligned} G_{1,10} &= G_{1,9}; & G_{1,9} &= G_{1,8}, & \dots & G_{1,3} &= G_{1,2}; & G_{1,2} &= G_{1,1} + G_{2,10}; \\ G_{2,10} &= G_{2,9}; & G_{2,9} &= G_{2,8}, & \dots & G_{2,3} &= G_{2,2}; & G_{2,2} &= G_{2,1} + G_{3,10}; \\ G_{3,10} &= G_{3,9}; & G_{3,9} &= G_{3,8}, & \dots & G_{3,3} &= G_{3,2}; & G_{3,2} &= G_{3,1} + G_{4,10}; \\ G_{4,10} &= G_{4,9}; & G_{4,9} &= G_{4,8}, & \dots & G_{4,3} &= G_{4,2}; & G_{4,2} &= G_{4,1}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

i є системою 36 нелінійних рівнянь відносно міжросельних тисків $P_{i,j}$, де $i = 1; 4$; $j = 1; 9$.

Моделювання роботи схеми задавача тисків, представленого на рис. 5, показало, що зміна вхідного тиску не призводить до зміни коефіцієнтів поділу $\chi_{i,j}$. Проте зміна тиску P_0 зумовлює невелику зміну $\chi_{i,j}$, так, наприклад, при однонапрямленій зміні тисків живлення ($P_{1,10}$, P_0) на ± 50 Па максимальне відхилення коефіцієнтів поділу $\chi_{i,j}$ не перевищує 0,005 %. Зміна температури на ± 5 К спричинює відхилення коефіцієнтів поділу на величину до 0,2 %.

6. Обговорення результатів дослідження лінійних подільників і розроблення задавачів різновеликих тисків

Результати дослідження дво- та багатокапілярних подільників тисків забезпечили розроблення схем каскадного з'єднання і бінарного відгалуження подільників. Застосування задавачів тисків, побудованих на основі таких подільників, уможлиблює компенсацію неконтрольованих впливів зовнішніх факторів у різних газодинамічних системах, в яких треба стабілізувати тиски. Так, наприклад, у газодинамічних синтезаторах газових сумішей завдяки їм забезпечуються пропорційні зміни тисків на входах дозуючих капілярів і відповідно витрати всіх дозованих компо-

нентів, так що їх концентрації у суміші залишаються незмінними. Такий ефект є фактично неможливим при використанні окремих незалежних стабілізаторів тиску для кожного компонента синтезованої суміші.

Поряд із зазначеними перевагами розроблених задавачів слід визнати необхідність застосування у них стабілізатора абсолютного тиску на виході, хоча нелінійність подільника без нього не є суттєвою.

Дослідження подільників тиску показало перспективу їх використання в задавачах різновеликих тисків, тобто для одночасного завдання великої кількості суттєво різних за значенням абсолютних тисків (перепадів). Такі задавачі особливо є перспективними для побудови синтезаторів газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. У зв'язку із цим були розроблені дві схеми – каскадна та схема з бінарними відгалуженнями подільників тисків. Перевагою першої є можливість її перенастроювання на завдання інших тисків перемиканням камер завдання повторювачів на інші міжкапілярні камери подільників. Недоліком є необхідність використання для побудови схеми повторювачів тисків, що обмежує коефіцієнт поділу тисків. Перевагою другої схеми є її функціонування без повторювачів тисків, що знімає обмеження на завдання нею будь-яких малих тисків, які виникають у газоаналітичній практиці. Недолік цієї схеми полягає у неможливості її перенастроювання на інші міжросельні тиски (перепади) без заміни практично усіх капілярів.

Застосування таких схем у задавачах тисків відкриває перспективу побудови високоточних газодинамічних засобів, зокрема для одержання складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів, завдання малих і мікровитрат газів, перевірки мікроманометрів.

Достатньо велика різноманітність задач практики науково-дослідних робіт в газоаналітичній галузі вимагає розроблення засобів для забезпечення розгортання тисків за залежностями, відмінними від лінійних. Тому вирішення такої задачі потребує окремого подальшого дослідження капілярних подільників тисків.

7. Висновки

1. Показана можливість забезпечення лінійності зміни міжросельних тисків капілярних подільників тиску, а тим самим і постійності коефіцієнтів поділу тисків.
2. На основі з'єднання лінійних подільників тиску побудовані схеми, які забезпечують коефіцієнти поділу на рівні кількох порядків.
3. За допомогою схеми з бінарними відгалуженнями капілярних подільників тисків запропонований лінійний чотиридекадний задавач абсолютних тисків (перепадів) в діапазоні 105–115 кПа (0–10 кПа). Задавач практично нечутливий до впливу тисків живлення на коефіцієнти поділу і їх відхилення є менше $\pm 0,2$ % при зміні температури у межах ± 5 К.

Література

1. The 8th international Gas Analysis Symposium & Exhibition WTC Rotterdam, the Netherlands [Electronic resource]. – GAS 2015. – 2015. – Available at <http://www.gas2015.org/publicaties/4349>

2. Demichelis, A. Metrological performances of mass flow controllers for dynamic gas dilution [Text] / A. Demichelis, G. Sassi, M. P. Sassi // 20th IMEKO World Congress 2012. Busan, Republic of Korea. – 2012. – Vol. 1. – P. 1014–1017.
3. Хацкевич, Е. А. Контроль качества природных газов хроматографическим методом [Текст] / Е. А. Хацкевич. – СПб.: Б.и., 2000. – 218 с.
4. Nelson, G. O. Gas mixtures: preparation and control [Text] / G. O. Nelson. – Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
5. Ділай, І. В. Розроблення дросельного задавача суттєво різних тисків для газодинамічних засобів [Текст] / І. В. Ділай, З. М. Теплюх // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 6, № 7 (72). – С. 28–33. doi: 10.15587/1729-4061.2014.31390
6. Теплюх, З. Н. Задатчик расхода газа-носителя в хроматографе [Текст] / З. Н. Теплюх, И. В. Дилай // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 41–44.
7. Кучерук, В. Ю. Система автоматичного керування котельною установкою з контролем складу димових газів на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу [Текст] / В. Ю. Кучерук, І. А. Дудатьєв // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – № 3. – С. 1–7. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.files/uk/11vykoim_ua.pdf
8. Івасенко, В. М. Методи і прилади контролю викидів автозаправних станцій [Текст] / В. М. Івасенко, В. П. Приміський // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 60 (1102). – С. 174–180.
9. Бондаренко, В. Л. Методы приготовления смесей на основе инертных газов [Текст] / В. Л. Бондаренко, Н. П. Лосяков, Ю. М. Симоненко, О. В. Дьяченко, Т. В. Дьяченко // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 8. – С. 41–53.
10. Dantas, H. V. An automatic system for accurate preparation of gas mixtures [Text] / H. V. Dantas, M. F. Barbosa, P. N. T. Moreira, R. K. H. Galvao, M. C. U. Araujo // Microchemical Journal. – 2015. – Vol. 119. – P. 123–127. doi: 10.1016/j.microc.2014.11.011
11. Vitenberg, A. G. Preparation of stable gas mixtures with microconcentrations of volatile substances in vapor-phase sources at elevated pressures [Text] / A. G. Vitenberg, Yu. G. Dobryakov, E. M. Gromysh // Journal of Analytical Chemistry. – 2010. – Vol. 65, Issue 12. – P. 1284–1290. doi: 10.1134/s1061934810120142
12. Brewer, P. J. A high accuracy dilution system for generating low concentration reference standards of reactive gases [Text] / P. J. Brewer, M. D. Mi arro, E. A. di Meane, R. J. C. Brown // Measurement. – 2014. – Vol. 47. – P. 607–612. doi: 10.1016/j.measurement.2013.09.045
13. Helwig, N. Gas mixing apparatus for automated gas sensor characterization [Text] / N. Helwig, M. Schuler, C. Bur, A. Schutze, T. Sauerwald // Measurement Science and Technology. – 2014. – Vol. 25, Issue 5. – P. 055903. doi: 10.1088/0957-0233/25/5/055903
14. Мошковська, Л. Метрологічне забезпечення газоаналітичних вимірювань [Текст] / Л. Мошковська, В. Приміський, І. Ніколаєв // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2010. – № 2. – С. 34–38.
15. Vins, Vaclav. An apparatus with a horizontal capillary tube intended for measurement of the surface tension of supercooled liquids [Text] / V. Vins, J. Hosek, J. Hykl, J. Hruby // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 92. – P. 02108. doi: 10.1051/epjconf/20159202108
16. Ділай, І. В. Оптиміальні дросельні схеми динамічних систем приготування складних газових сумішей [Текст] / І. В. Ділай, З. М. Теплюх, Ю. З. Вашкурак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 4, № 8 (70). – С. 39–45. doi: 10.15587/1729-4061.2014.26257
17. Стабилизатор абсолютного давления САД-307 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oavt.ru/uploads/catalog/62_file.pdf
18. Прохоров, В. А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств [Текст] / В. А. Прохоров. – М.: Химия, 1984. – 320 с.